

# 핵연료집합체에서의 대형이차와류 혼합날개의 난류생성 특성에 관한 연구

안정수<sup>†</sup>·최영돈<sup>\*</sup>

## A Study of Turbulence Generation Characteristics of Large Scale Vortex Flow Mixing Vane of Nuclear Fuel Rod Bundle

J. S. An, Y. D. Choi

**Key Words:** Nuclear Fuel Rod Bundle(핵연료 집합체), LSVF(대형이차와류), Mixing Vane(혼합날개)

### Abstract

The common method to improve heat transfer in Nuclear fuel rod bundle is install a mixing vane in space grid. The previous split mixing vane is guides cooling water to swirl flow in sub-channel of fuel assembly. But, this swirl flow decay rapidly after mixing vane and the effect of enhancing the heat transfer vanish behind this short region. The large scale secondary vortex flow was generated by rearranging the inclined angle direction of mixing vanes to the coordinated directions. This LSVF mixing vanes generate the most strong secondary flow vortices which maintain about 35  $D_H$  after the spacer grid and the streamwise vorticity in subchannel with LSVF mixing vane sustain two times more than that in subchannel with split mixing vane. The turbulent kinetic energy and the Reynolds stresses generated by the mixing vanes have nearly same scales but maintain twice more than previous type.

### 1. 서 론

원자로 연료봉 집합체내의 지지격자는 연료봉 다발의 간격을 일정하게 유지시켜 냉각재의 유로를 확보하고 유체 유인진동으로 인한 연료봉의 손상을 방지해줄 뿐만 아니라 유동혼합을 촉진하여 열전달 성능을 증가시킨다. 유동 혼합은 지지격자 근처에서 가장 활발하게 일어나며 하류 방향으로 빠르게 감소하여 일정한 수준의 유동 혼합을 유지한다. 열전달 성능을 향상시키기 위한 방법으로 냉각수의 흐름방향을 조절하고 혼합할 수

있도록 곡선형의 지지격자관 형상을 사용하거나 지지격자에 혼합날개를 부착하고 있다. 혼합날개는 부수로 내에 와류(vortex flow)를 발생시켜 유동 혼합을 촉진하는 역할을 하며 혼합날개의 모양, 각도, 크기, 그리고 위치에 관한 연구들이 수행되고 있다.<sup>[1]</sup> 지지격자와 혼합날개의 새로운 형상에 관한 연구는 궁극적으로 열전달 성능 향상을 위해 수행되고 있으며 과도한 유동저항으로 인한 압력강하의 급격한 상승이나 유체 유인 진동으로 인한 열수력 건전성을 해치지 않는 범위 내에서 수행되고 있다.

### 2. 대형2차와류 혼합날개

#### 2.1 대형이차와류 혼합날개의 개념

기존의 split 형태의 혼합날개는 부수로 중심에 와류를 발생시키나 이 와류가 생성하는 난류는

<sup>†</sup> 고려대학교 대학원

E-mail : anjsoo42@hotmail.com

TEL : (02)926-5908 FAX : (02)926-

\* 고려대학교

길이척도(length scale)가 대단히 작기 때문에 바로 소멸되어 혼합날개에 의한 열전달 성능 증진효과가 단거리에 제한된다.<sup>[2]</sup> 지속적인 난류 생성 효과를 얻으려면 지지격자의 설치 간격을 좁혀야 하나 이는 유동 방해물이 많아져서 펌프 구동력을 크게 증가시키는 요인이 된다.

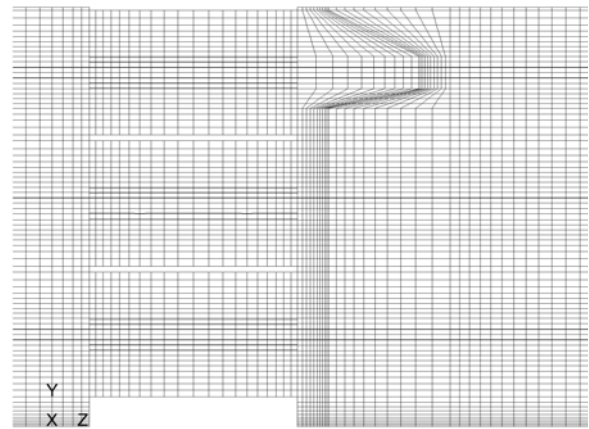
더욱이 부수로내의 유동이 지배적이며 인접 부수로간 유동인 교차류(cross flow)의 변화가 적기 때문에 부수로와 부수로간의 난류 증진효과 및 열전달 효과를 기대할 수 없다.<sup>[3]</sup> 단일 부수로내에서만 선회류(swirl)를 생성시키는 기존의 방식에서 벗어나 부수로 전체에 대하여 지지격자에 부착된 혼합날개들의 각도를 일정한 방향으로 조정하면 대형 2차 와류(Large Scale Vortex Flow, LSVF)를 발생시킬 수 있다.<sup>[4]</sup> 이 LSVF에 의한 대형 2차 와류는 단일 부수로 중심에서의 와류에 비해 서서히 소멸되기 때문에 기존 펌프 구동력의 변화 없이 열전달 성능을 증진하는 효과를 가져올 수 있다. 또한 부수로내의 유동이 아닌 부수로 전체에 대한 유동을 일으키므로 교차류(cross flow)가 비약적으로 확대되어 유체의 온도 균등화에 큰 기여를 할 것으로 여겨져 평균 열전달성능의 향상과 더불어 원자로의 건전성확보에 도움을 줄것으로 기대된다.<sup>[5]</sup>

## 2.2 3×3 연료봉 전산해석

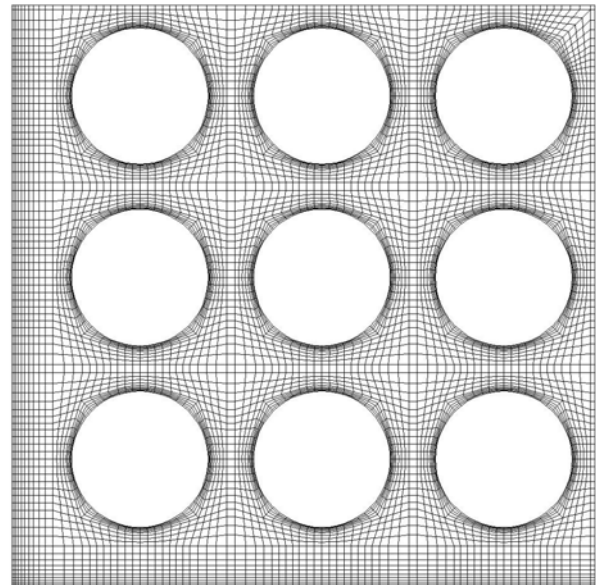
가압경수형 원자력발전소에서 사용하고 있는 연료봉 집합체는 발전용량에 따라 14×14, 16×16, 17×17 집합체의 다양한 봉다발을 사용하고 있으나 본 연구에 사용한 모의 연료봉 집합체는 실험용량과 전산해석의 능력을 고려하여 냉각재의 유로를 잡아주는 정사각 닥트 형태의 하우스징(housing)과 그 내부에 6×6 연료봉으로 구성되어 있고 지지격자가 60 DH 간격으로 설치된 봉다발 형태를 가지고 있으며 그 재원은 Table 1과 같다.

**Table 1** Rod bundle channel data.

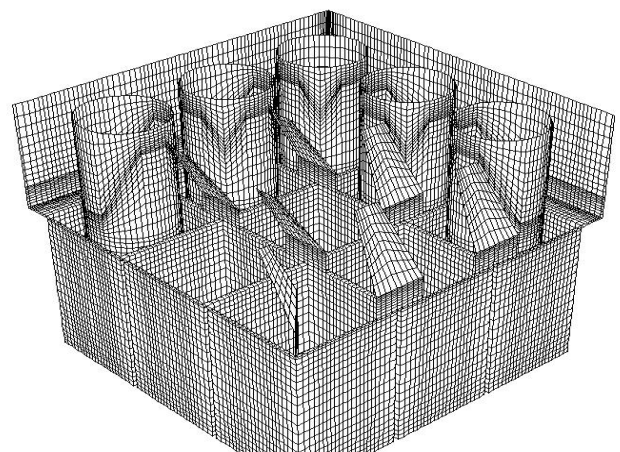
Rod Diameter (mm)	10.0
Rod Pitch (mm)	13.3
Spacer Grid Pitch (mm)	720
Housing (mm)	85.3
Hydraulic Diameter (mm)	12.09
Reynolds Number	61,400
Temperature (°C)	296
Fuel Rod Heat Flux (KW/m <sup>2</sup> )	567.039



(a) Streamwise direction



(b) Spanwise direction



(c) Fuel Assembly

**Fig. 1** Grid structure.

본 연구에서는 FLUENT Code를 사용하여 유동을 해석하였으며 반경방향으로는 순환조건(cyclic condition)을 삽입하여 3×3 연료봉만을 전산해석하였다. 사용된 격자는 Figure 1과 같다.

초기조건 및 입구조건을 획득하기 위하여 한국 표준형 원자력 발전소인 울진원자력 3/4호기의 노심 열수력자료<sup>[6]</sup>를 참조하였다.

### 3. 대형2차와류 혼합날개의 난류특성

#### 3.1 평균 유동장

Figure 2는 주유동 방향으로 혼합날개에 의해 발생된 2차 유동의 강도의 단면평균 값의 변화를 보여주고 있다. 유동 혼합은 부수로에서 횡방향 속도 절댓값, 즉 2차 유동의 합으로 정의되므로 2차 유동은 부수로 사이의 유동 혼합을 일으키는 주요 인자이다.

혼합날개가 부착되어 있지 않은 부수로에서는 지지격자 하류에서 2차 유동이 미약하게 나타나고 있으나 이는 지지격자에 의한 유로 단면적의 변화로 인한 것으로 생성과 동시에 급격히 소멸하게 된다. 따라서 지지격자는 유동의 혼합에 거의 영향을 주지 못하며 유동혼합에 의한 열전달 증진도 기대할 수 없을 것으로 여겨진다.

LSVF 혼합날개가 부착된 부수로에서는 강하게 발생하는 대형 2차 와류로 인해 지속적으로 2차 유동이 일어나며 그 영향이 하류까지 유지되고 있다. LSVF 혼합날개에서 발생하는 2차 유동의 강도는 split 혼합날개의 경우와 크게 차이가 나지 않으나 쉽게 소멸되지 않고 20 Z/Dh 이후에도 10% 이상 지속되어 split 혼합날개보다 2배 이상 지속되는 것을 알 수 있다. 따라서 유동혼합에 의한 열전달 성능 향상도 split 혼합날개의 경우보다 더 클것으로 예상되어진다.

Figure 3은 혼합날개가 부착된 부수로에 대해 유로 단면의 2차 유동의 변화를 속도벡터로 보여주고 있다. split 혼합날개의 경우는 단일 부수로 내에 부수로의 중심을 중심으로하는 독립적인 선회류(swirl)를 형성하고 다시 선회류와 연료봉 사이에 조그만 와류(vortex)를 형성하고 있다. 인접 부수로 사이에서의 유동은 서로 대칭이 아니고 교차류(cross flow)도 나타나고 있으나 그 정도는 크지 않다. 하우징(housing) 벽면 부수로에서는 혼합날개가 없으므로 유동혼합이 거의 없으며 벽면 효과의 영향으로 현저하게 유동장이 발달하지 못하고 있다.

단일 부수로에 독립적으로 2차 유동을 형성하

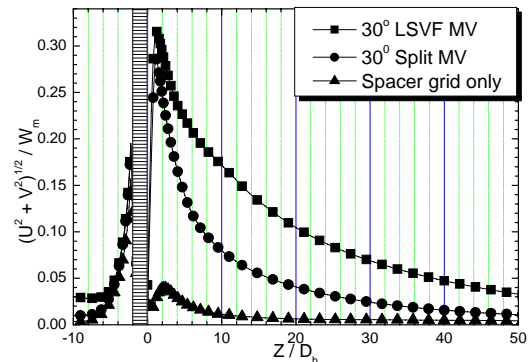
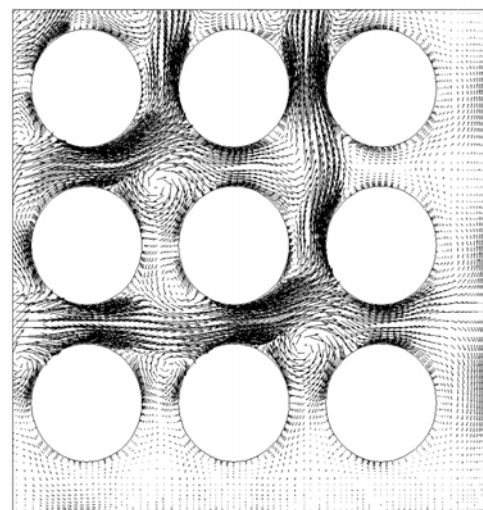
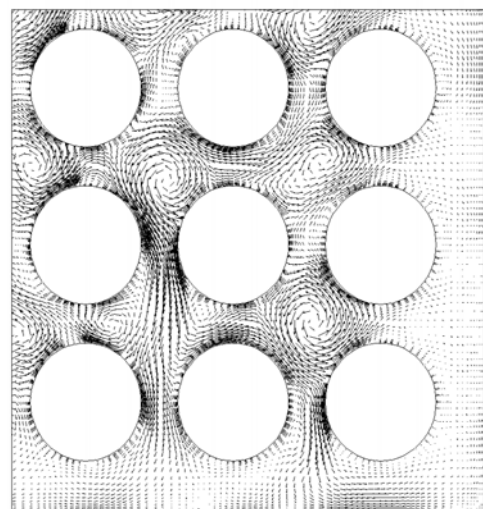


Fig. 2 Variation of cross-sectional averaged secondary flow intensity.



(a) LSVF M/V



(B) Split M/V

Fig. 3 Distribution of secondary flow vector at 6 Z/Dh

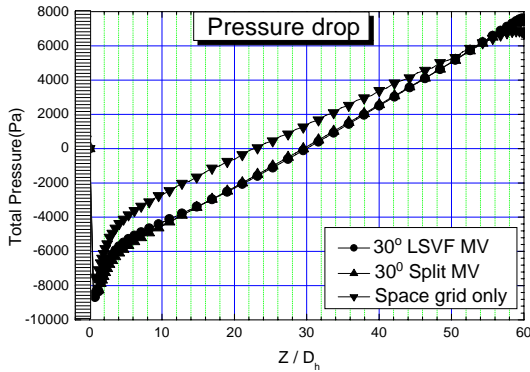


Fig. 4 Variation of pressure drop after spacer grid

는 split 혼합날개와 달리 LSVF 혼합날개는 의도한 바와 같이 전체 부수로에 대해 2차 유동을 형성하고 있다. 따라서 교차류가 비약적으로 증가되어 각 부수로간 온도 균등화에 큰 기여를 할 것으로 여겨져 평균 열전달 성능의 향상과 더불어 원자로의 건전성 확보에 도움을 줄 것으로 기대된다.

Figure 4는 봉다발 부수로 유동장에서 전압력 분포를 보여주고 있다. 전압력은 펌프구동력에 직접영향을 끼치므로 혼합날개 최적설계에 중요한 인자이나 혼합날개의 형상에 따른 압력손실의 차이는 크게 나타나지 않고 있다. 선행연구에 따르면 압력손실의 차이는 혼합날개의 날개각에 민감하다.

3.2 난류생성 메카니즘

혼합날개가 없는 경우 부수로 내에서의 난류공급은 지지격자에 의한 것이 거의 유일하다고 할 수 있다. 지지격자에 의해 평균유동장이 교란되고 이로 인해 전단응력이 발생하여 난류가 발생하게 되나 그 이후로는 점성소산에 의해 감소되는 양상을 보인다.

부수로내 유동장장에서 또다른 난류공급원은 혼합날개에 의해 발생한 2차유동이다. 2차 유동으로 발생하는 와류, 선회유동등에서 발생하는 전단응력에 의해 발생된다. 2차 유동으로 발생하는 난류는 지지격자의 경우와는 달리 2차 유동이 지속되는 한 연속적으로 발생하게 된다.

Figure 5는 주유동 방향으로 난류운동에너지를 단면평균값의 변화를 보여주는데 Split 혼합날개의 경우, 오히려 LSVF 혼합날개에 비해 더 작은 2차 유동을 생성시킴에도 불구하고 더 큰 난류운동에너지를 생성되나 급격히 소멸된다. 이는 난

류생성이 2차 유동에 직접 연관되지 않고, 2차 유동에 의해 발생한 와류(vortex)에 의해 발생하는 전단응력으로 이루어지기 때문이다.

LSVF 혼합날개의 경우, split 혼합날개보다 약간 작게 난류운동에너지를 생성되나 그 지속은 더 뛰어난 것을 알 수 있다.

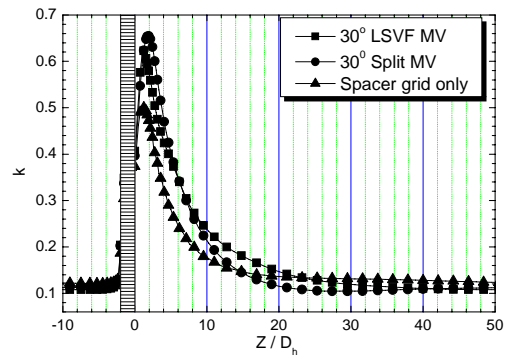
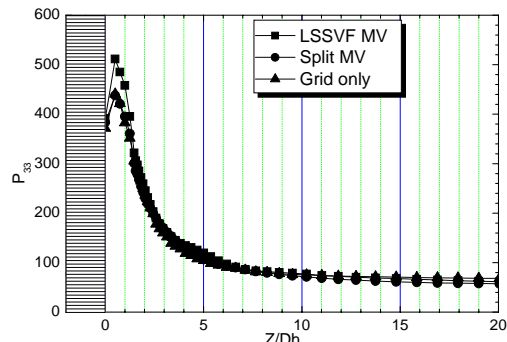
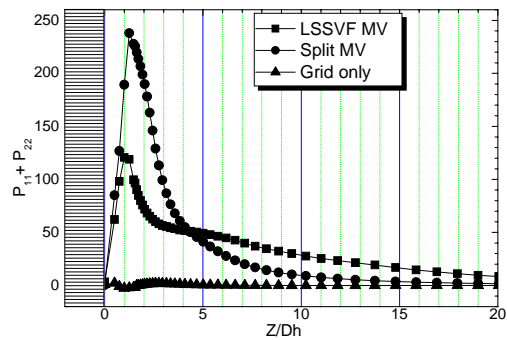


Fig. 5 Variation of cross-sectional averaged turbulence kinetic energy.



(a) Axial Reynolds-stress production.



(b) Tangential Reynolds-stress production.

Fig. 6 Variation of cross-sectional averaged production

위에서 제시한 연료봉 부수로내 난류생성 메카니즘에 대한 명확한 설명을 위해 Figure 6 에서 주유동방향 레이놀즈 응력의 생성향과 횡방향 레이놀즈 응력의 생성향 단면평균값의 변화를 나타내었다

지지격자에 의한 격자난류(grid turbulence)는 주유동 방향속도성분의 전단응력을 발생시키므로 주유동 방향의 레이놀즈 응력만을 크게 발생시킨다. 따라서 주유동 방향 레이놀즈 응력향은 혼합날개의 유무와 관계없이 모든 경우에 대해서 같은 경향을 보이고 있다. 즉, 지지격자내에서는 격자난류를 생성하고 지지격자 출구에서는 단면증가에 의한 난류생성이 이루어 지다가 유동이 발달됨에 따라 주유동 방향 레이놀즈 응력의 생성은 사라지게 된다.

이와 달리 횡방향 레이놀즈 응력은 2차 유동의 와류, 선회유동등에서 발생하는 전단응력에 의해 발생된다. split 혼합날개의 경우는 선회유동이 더 작은 영역에서 이루어지므로 전단응력은 크게 나타나 횡방향 레이놀즈응력의 생성이 더 크게 나타난다. 하지만 이러한 선회유동은 이후 급격히 감소하여 10 Z/Dh 이후에는 거의 소멸하며 이에 따라 횡방향 레이놀즈 응력의 생성도 급격히 감소하게 된다.

LSVF 혼합날개의 경우는 2차 유동이 전 부수로내의 큰 영역에서 이루어지므로 전단응력은 더 작고 초기에 횡방향 레이놀즈 응력의 생성이 작게 나타난다. 하지만 2차 유동의 지속이 split 혼합날개에 비해 2배 이상 되기 때문에 횡방향 레이놀즈 응력의 생성도 지속적으로 이루어져 결국은 전체 난류운동에너지를 하류까지 유지시킬수 있게 된다.

3.3 난류구조의 변화

Figure 7 은 주유동방향에 따라 축방향 와도(vorticity)의 단면평균한 값을 보여주고 있다. 와도는 와류(vortex)의 강도를 나타내며 레이놀즈 응력의 생성에 직접적인 연관이 있다. 또한 와류는 난류운동에너지를 하류로 전달하는 역할을 하므로 축방향 와도의 분석을 통해 횡방향 레이놀즈 응력의 거동을 살펴볼 수 있다.

Split 혼합날개의 경우 생성된 와도는 급격히 감소하며 점성소산과 같이  $x^{-1}$ 에 비례하고 있다. LSVF 혼합날개의 경우 큰 영역에서의 2차 유동으로 인해 와도는 상대적으로 작게 예측된다. 하지만 바로 소멸되지 않고 어느 정도 지속된 후에야 소멸되고 있다. 특히 Z/Dh 6~20 영역

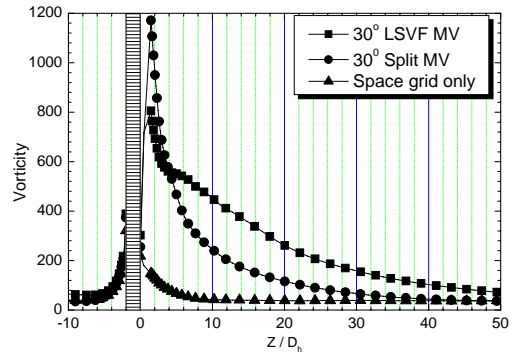
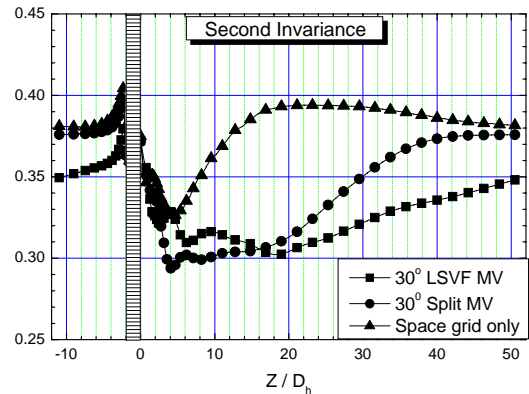
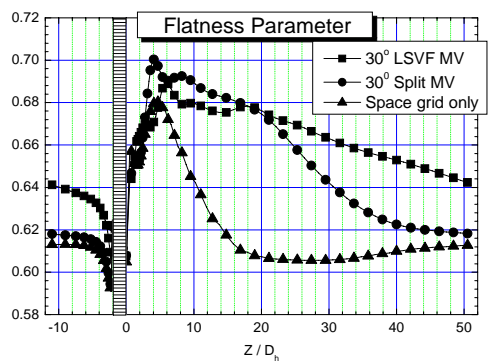


Fig. 7 Variation of cross-sectional averaged axial vorticity intensity



(a) Second invariance



(b) Flatness parameter

Fig. 8 Variation of cross-sectional averaged Turbulence Invariance

에서는 2차 유동의 순환고리가 유지되고 있으며 이러한 순환고리의 회전도는 선형적으로 감소하고 있다. 30 Z/Dh 이후에 순환고리가 파괴되면

서 2차 유동이 균질화되면 와도 역시  $x^{-1}$ 에 비례로 감소하게 된다.

Fig. 8 은 주유동 방향에 따라 난류 성분의 등방성을 평가할 수 있는 불변항의 변화를 나타내고 있다. 이차 불변항  $A_2$ 는 작을수록 평면변수  $A$ 는 클수록 등방성 난류에 가깝게 된다.

혼합날개가 부착되지 않은 부수로는 지지격자 후방에서 약간의 등방성화가 보이다가 바로 비등방성화하고 split 혼합날개 부착 부수로는 5~20 Z/Dh에서 등방성화가 크나 그후 급격히 비등방성이 커진다. 이것은 2차 와류의 소멸에 따라 벽면 난류가 전체를 지배하기 때문이다. LSVF 혼합날개 부착 부수로에서는 20 Z/Dh 까지 등방성화가 지속되다가 그 후에 서서히 비등방성화가 된다. 이것은 LSVF 혼합날개에 의해서 강한 2차 유동이 발생해서 서서히 소멸되기 때문에 비등방성화가 서서히 진행되는 것이다.

열전달 측면에 보면 부수로 벽면에 수직방향의 레이놀즈응력  $\overline{vv}$ ,  $\overline{uw}$ ,  $\overline{vw}$  등이 커야 열전달이 커지는데, 난류생성은 주로  $\overline{uw}$ 에 의해서 되므로 등방성화가 많이 이루어 질수록 열전달 촉진에 크다. 따라서 난류구조면에서 LSVF 혼합날개가 split 혼합날개보다 우수함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

LSVF MV의 경우 기존의 Split MV 보다 큰 길이척도의 2차와류를 발생시키고 지속성도 2배 이상 증가되었으며 인접부수로와의 유동혼합이 활발하였다

난류운동에너지는 1차로 지지격자의 유로축소 등에 의해 생성하고 2차로 혼합날개로 발생된 와류에 의해 생성되었다 주방향 속도성분은 유로의 축소에 의한 난류발생에 영향을 주나 2차유동으로 발생된 난류가 난류의 지속에 기여한다

유로축소의 영향은 모든 경우가 비슷하나 2차 유동에 의한 영향은 보다 큰 길이차원의 난류를 포함하는 LSVF MV가 뛰어나고 지속성도 크다

난류운동에너지를 전달하는 역할을 하는 와도의 경우도 LSVF MV 가 2배이상 지속성이 뛰어나다.

#### 후 기

위 연구는 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) W.K. In, D.S. Oh And T.H. Chun, 2001, Flow Analysis For Optimum Design Of Mixing Vane In A PWR Fuel Assembly J. Of KNS, Vol. 33, No. 3, p. 327.
- (2) S.K. Yang And M.K. Chung, 1996, Spacer Grid Effects On Turbulent Flow In Rod Bundles J. Of KNS, Vol. 28, No. 1, p. 56.
- (3) Y.F. Shen, Z.D. Cao, And Q.G. Lu, 1991, An Investigation Of Crossflow Mixing Effect Caused By Grid Spacer With Mixing Blades In A Rod Bundle Nucl. Engng And Design 125, pp. 111-119.
- (4) J.S. Park, 2001, A Study of Turbulent Heat Transfer Performance Enhancement in Rod Bundle Subchannel by the Large Scale Secondary Vortex Flow, Ph. D. thesis, The University of Korea. pp.13~15, 64~66.
- (5) W.T. Sha, 1980, An Overview On Rod-Bundle Thermal Hydraulic Analysis Nucl. Engng And Design 62, pp. 1-24.
- (6) KEPCO, 1998, Final Safety Analysis Report For Uljin NPP 3/4 Table 4.4-1, Fig. 4.4-2.